

ASENKRON MOTOR STATOR OLUK GEOMETRİSİNİN EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK İNCELENMESİ

A. Gökhan YETGİN¹, Mustafa TURAN², Barış CEVHER³, Banu TABAK⁴

A. İhsan ÇANAKOĞLU⁵

^{1,2,3,4}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi
Sakarya Üniversitesi, 54187, Adapazarı

⁵Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi
Dumlupınar Üniversitesi, 43100, Kütahya

¹e-posta: agyetingin@sakarya.edu.tr, ²e-posta: turan@sakarya.edu.tr,
³e-posta: bcevher@sakarya.edu.tr, ⁴e-posta: btabak@sakarya.edu.tr,
⁵e-posta: acanakoglu@dumlupinar.edu.tr

Anahtar sözcükler: Asenkron Motor Stator Oluk Geometrisi, Eşdeğer Devre Parametreleri, Ortalama Akı Yoğunluğu, Magnetik Vektör Potansiyeli (MVP), SEY

ÖZET

Bu çalışmada, asenkron motor stator oluk geometrisine ait, oluk yüksekliği (h_s), sırt yüksekliği (h_{cs}) ve oluk üst genişliği (b_{s2}) parametrelerinin değerleri, orijinal boyutlarından % 40 oranında artırılıp azaltularak yeni oluşan geometrilerde eşdeğer devre parametreleri (R_1 - R_2 - X_1 - X_2) sonlu elemanlar yöntemi (SEY) yardımıyla, 3kW'lık sincap kafesli asenkron motor için belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde FEMM (Finite Element Method Magnetics) adlı paket programı kullanılmıştır. Bunun yanında asenkron motorun yeni oluk geometrileri için stator ve rotor nüvesindeki akı yoğunluk değerleri ve magnetik vektör potansiyellerinin (MVP - Magnetik Alan) değişimleri incelenmiştir. Yeni oluşan geometriler arasından tasarım için en uygun geometri belirlenmiştir.

1. GİRİŞ

Günümüzde yaygın bir şekilde kullanılan asenkron makineler genellikle motor çalışma durumunda bir ve üç fazlı olarak imal edilirler. İcadından itibaren günümüze kadar teknolojiye gelişmeler ile birlikte aynı güç değeri için boyutları ve fiyatı oldukça düşmüştür. Bugün birkaç watt' tan, megawatt' lara kadar güçlerde imal edilebilmektedirler. Burada dikkat edilmesi gereken nokta istenilen güçteki bir motor için maksimum verimi sağlayacak şekilde tasarım yapılmasıdır.

Asenkron motorun kullanıcı tarafından istenilen güç, moment ve verimi sağlayacak olan çalışma noktalarının elde edilebilmesi için ise motor tasarlanırken, motorun stator ve rotor oluk geometrileri, stator ve rotor iç-dış çap uzunlukları, hava aralığı uzunluğu vb değerlerin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir [1].

Şu da unutulmamalıdır ki, asenkron makinelerin işletme kolaylığının ve kontrollerinin basit olmasının yanında, stator ve rotor oluk geometrileri bakımından aslında karmaşık yapıya makinalardır ve motorun stator-rotor nüvesinde ve hava aralığında en iyi akı dağılımını elde edebilmek için düzgün bir oluk tasarımı gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden Şekil 2' de verilen stator oluk geometrisindeki parametrelerin değerleri uygun bir şekilde belirlenmelidir.

Bu çalışmada, asenkron motorun stator oluk yükseklik değeri, 9 mm ile 22 mm arasında değiştirilmiştir. Buna bağlı olarak oluk sırt yüksekliği ve oluk üst genişliği değerleri de değiştirilerek motorun eşdeğer devre parametrelerinin değişimi incelenmiş ve uygulama için optimum oluk geometrisi belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca motorun oluk yüksekliği değeri arttıkça oluşan yeni geometriler için magnetik vektör potansiyellerinin ve akı yoğunluklarının değişimi incelenmiştir.

2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Asenkron motor tasarımının optimizasyonu 1960' lara dayanır ve bu alanda Veinot dijital bilgisayar tabanlı yöntemleri önermiştir. Yapılan ilk çalışmalarda üretim maliyetinin optimizasyonu ana amaçtı [2]. Petrol krizinden sonra ise enerji fiyatlarının artmasıyla Buschart ve Diamant gibi bazı araştırmacılar, asenkron motorların optimizasyonu ve parametrelerinin tayini hakkında daha fazla çalışmaya başlamışlardır. Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık ve Genetik Algoritma gibi yöntemleri asenkron motorların tasarım optimizasyonunda kullanmışlardır [2-3]. Sonlu elemanlar yöntemi, fiziksel matematiğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Yöntem ilk olarak 1940' lı yıllarda önerilmiş fakat 1950' li yıllarda uçak tasarımında kullanılmaya başlanmıştır [4]. Chari ve Silvester [5] sonlu elemanlar yöntemini DC motor, SR motor ve asenkron motorların analizi gibi elektromagnetik problemlere uygulayan ilk kişilerdir [2]. 1970' den sonraki yıllarda sonlu elemanlar yöntemi AC ve DC genratörlere [5-6], transformatörlere [7-8], solenoid ve aktuatörlere [9-10] uygulanmıştır [11].

SEY' in hem karmaşık fiziksel şekilleri kolay modellemesinden hem de lineer olmayan malzemelerin tanımlanmasına izin verdiğinden elektrik motorlarının analizinde en çok tercih edilen sayısal yöntemdir [12-13]. SEY elektrik mühendisliğinin çeşitli alanlarında kullanılmaya başlandığından itibaren asenkron makinaların analizine yönelik uygulamalarda başlamıştır. Brauer çeşitli çalışmalarında bir ve üç fazlı asenkron makinaların SEY ile modellenmesinin nasıl yapılacağını ayrıntıları ile vermiştir [14,15,16,17]. Williamson ve Robinson asenkron makinaların SEY ile analizinde geliştirdikleri yöntemler ile hesaplama maliyetini oldukça düşürmüşlerdir [18-19]. Günümüzde ise sonlu elemanlar yöntemi mühendislik problemlerinin çözümlerinde vazgeçilmez bir yöntem olarak yerini almıştır.

SEY ile analizde ilk modeller stator ve rotorun ayrı ayrı ele alınmasına dayanmaktadır. Stator ve rotorun magnetomotor kuvvetlerinin birbirine etkisi, iç ve dış yüzeylerinde tanımlanan magnetomotor kuvvet değerleriyle göz önüne alınmaktaydı. Stator ve rotorun ayrı ayrı ele alınması maliyeti düşürmekle birlikte yüzeylerde magnetomotor kuvveti tanımlamasının güçlüğüne ortaya çıkartmaktaydı. Daha sonraları bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle stator ve rotorun birlikte modellenmesi kolaylaştı. Bu modellemelerde hava aralığının da modellenmesi sebebiyle endüktansların hesaplanması kolaylaşmıştır [1].

3. ASENKRON MOTORUN EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİNİN SEY İLE HESAPLANMASI

Asenkron motorun bir faz eşdeğer devre parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanması aşağıda ayrıntıları ile verilmiştir.

3.1. Harmonik Alanların SEY Formülasyonu

Bir asenkron makinanın kesit alanında geçerli olan diferansiyel denklem aşağıdaki şekilde tanımlanır [20].

$$\nabla * \left(g \nabla \dot{A} \right) + j \omega \sigma A = J \quad (1)$$

İfade de A magnetik vektör potansiyel, ν reluktivite, ω açıl frekans, σ iletkenlik, J kaynak vektörüdür.

Analiz iki boyutlu yapılabacağından magnetik vektör potansiyelin ve J akım yoğunluğu vektörünün sadece z bileşenleri vardır. Dolayısıyla A sadece x ve y' nin fonksiyonudur. Kaynak vektörümüz sinüzoidal olduğundan aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$J = J \cos \omega t \quad (2)$$

Dolayısıyla vektör potansiyel de aşağıdaki formda olur.

$$A = |A| \cos(\omega t + \phi) \quad (3)$$

Bu ifadelerde kaynak akım değerlerinin ve çözüm sonucunda elde edilen vektör potansiyel değerlerinin kompleks olacağı görülür ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$|A| = \sqrt{(A^R)^2 + (A^I)^2} \quad (4)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{A^I}{A^R} \right] \quad (5)$$

Modellememizde tam geometri ele alındığından stator dış sınırında homojen Dirichlet sınır şartı tanımlıdır.

$$A = 0 \quad (6)$$

Galerkin yöntemi kullanılarak (1) eşitliği için ağırlıklı Reziduler teoremine göre aşağıdaki form elde edilir.

$$-\int_{\Omega} \nabla W g \nabla A d\Omega + \int_{\Gamma} W \frac{\partial A}{\partial n} d\Gamma - \int_{\Omega} W (i \sigma \omega A - J) d\Omega = 0 \quad (7)$$

Elde edilen bu denklem ile bir eleman üzerindeki vektör potansiyel aşağıdaki şekilde belirtilebilir [20].

$$A_e = \sum N_i A_i \quad (8)$$

(7) ifadesinde $W_i = N_i$ alınarak SEY için ayrık form aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\left[\int_e g \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dx dy - i \int_e \sigma \omega N_i N_j dx dy \right] A_i = \int_e N_i J dx dy \quad (9)$$

N_i ve N_j değerleri eleman enterpolasyon fonksiyonlarıdır. Üçgen elemanlar kullanılması durumunda (9) ifadesinden yola çıkılarak SEY için kapalı formda eşitlik aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$(P_{ij} + jq_{ij}) [A_i] = f_i + jg_i \quad (10)$$

Kapalı form için P_{ij} , q_{ij} , f_i ve g_i aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$p_{ij} = \frac{1}{4A\mu} (b_i b_j + c_i c_j) \quad (11)$$

$$q_{ij} = -\sigma \omega \int_e N_i N_j dx dy \quad (12)$$

$$= \frac{A\sigma\omega}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

J_R ve J_I , J vektörünün reel ve imajiner kısımlarıdır. Sonuç olarak bir eleman için sonlu eleman eşitliği, $\alpha = W\sigma\mu$ olmak üzere aşağıdaki şekilde yazılır.

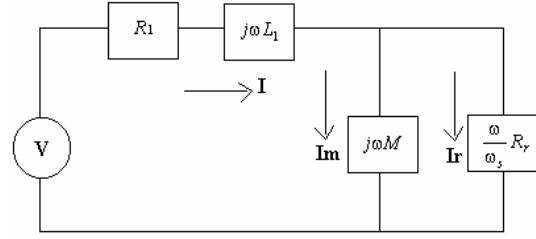
$$\begin{bmatrix} (3(b_1^2 + c_1^2) - 2i\alpha A^2) & (3(b_1 b_2 + c_1 c_2) - i\alpha A^2) & (3(b_1 b_3 + c_1 c_3) - i\alpha A^2) \\ & (3(b_2^2 + c_2^2) - 2i\alpha A^2) & (3(b_2 b_3 + c_2 c_3) - i\alpha A^2) \\ & & (3(b_3^2 + c_3^2) - 2i\alpha A^2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

(simetrik)

Eleman matrislerinin simetrik olduğu görülmektedir. Bu işlemlerden sonra sonlu eleman ağındaki elemanların birleştirilmesi yapılır.

3.2. SEY İçin Asenkron Makine Modeli

SEY ile asenkron makinenin parametrelerini tayin edebilmek için ilk önce uygun bir eşdeğer devre modeli ortaya konulmalıdır. Bu eşdeğer devrenin kararlı hal bir faz devre olması yeterlidir. Kararlı hal söz konusu olduğundan hız ve elektriksel frekans sabittir. Böyle bir eşdeğer devre Şekil-1' de verilmiştir [20].



Şekil-1. Asenkron motorun bir faz FEMM eşdeğer devresi

Bu eşdeğer devrede bütün kaçak endüktanslar stator tarafındaki L_l endüktansında toplanmıştır. Stator ile rotorun kuplajı ve rotor akımları M endüktansında tanımlanmıştır. ω uygulanan elektriksel frekansı göstermektedir. ω_s rotorun mekanik frekansı ile rotor akımlarının frekansı arasındaki farkı gösterir. Makina çift kutup sayısına sahipse, ω_r rotor açılma hızını göstermek üzere, ω_s aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\omega_s = \omega - p\omega_r \quad (15)$$

Bu devre modelinden yola çıkılarak faz akımı, faz gerilimi ve moment arasındaki ilişkileri ortaya çıkarabiliriz.

3.2.1. Asenkron motor empedansı

Model olarak alınan eşdeğer devreye göre bir fazın giriş empedansı aşağıdaki şekilde hesaplanır [20].

$$Z = R_s + j\omega \left(L_l + M \left(\frac{1}{1 + j\tau\omega_s} \right) \right) \quad (16)$$

Burada τ , M/R_r 'ye eşit rotor zaman sabitidir.

3.2.2. Kayma frekansına bağlı endüktans

Belirli bir kayma frekansında bir faz için akı halkası değeri,

$$\phi = \left(L_l + M \left(\frac{1}{1 + j\tau\omega_s} \right) \right) i \quad (17)$$

olarak yazılır. Bu ifadeyi akıma bölerek kayma frekansına bağlı olarak endüktans değeri elde edilir. Reel ve imajiner bileşenlerini ayırarak kayma frekansına bağlı endüktans aşağıdaki gibi hesaplanır [20].

$$L(\omega_s) = \left(L_l + \frac{M}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) - j \left(\frac{\tau\omega_s M}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \quad (18)$$

Kayma frekansına bağlı olan bu endüktans ifadesi motor parametrelerinin hesaplanmasında kullanacağımız ifadelerin başında gelmektedir.

Teknik olarak bir sargının endüktansı o bobini halkalayan akı değeriyle ilişkilidir. Sargının endüktansı bobinde depolanan enerji değerinin eşdeğer bir endüktansla depolanan enerjiye eşitlenmesiyle bulunabilir.

$$\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2} \int JAdV \quad (19)$$

İki boyutlu bir sistemde endüktans ifadesi,

$$L = \frac{1}{I^2} \iint JAdxdy \quad (20)$$

olarak belirlenir. Son yazılan ifadenin SEY eşitliği aşağıdaki şekilde düzenlenir.

$$L = \frac{1}{I^2} \sum_{e=1}^N \sum_{i=1}^M A_i \iint \alpha_i dx dy \quad (21)$$

I bobindeki akım, N eleman sayısını, M düğüm sayısını, A_i i . düğümün vektör potansiyelini, α ise eleman şekil fonksiyonunu gösterir. Bu ifadenin sonlu eleman terimleriyle yazılımı aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$L = \frac{1}{3I^2} \sum_{e=1}^N \int \Delta_e \int_{i=1}^M A_i \quad (22)$$

Δ_e eleman alanıdır. İfadelerde hesaplamaya katılacak elemanlar sadece bobini modelleyen elemanlardır [21].

FEMM programında endüktans hesabı seçilen bölgedeki toplam akı halkası prensibine dayandığından endüktans birimi HA^2 olarak verilir. 3 kW'lık makina için kayma frekansının 0-3 Hz aralığında 0.25 Hz artımlarıyla elde edilmiştir.

Öncelikle endüktans sonuçlarından imajiner endüktans değeri hesaplanır.

$$I_m(L) = L_i = - \left(\frac{\tau \omega_s M}{1 + (\tau \omega_s)^2} \right) \quad (23)$$

Endüktans hesabında matrisel formda kullanmak üzere c_1 ve c_2 gibi M ve τ 'ya bağlı olarak iki katsayı yazabiliriz.

$$\begin{aligned} c_1 &= \tau M \\ c_2 &= \tau^2 \end{aligned} \quad (24)$$

Bu eşitlikte c_1 ve c_2 parametreleri lineerdir ve aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$(\omega_s)c_1 + (L_i\omega_s^2)c_2 = -L_i \quad (25)$$

En küçük kareler yöntemi ile matris ve vektör tanımını aşağıdaki gibi yaparız.

$$m = \begin{bmatrix} \omega_{s,1} & L_{i,1}\omega_{s,1}^2 \\ \omega_{s,2} & L_{i,2}\omega_{s,2}^2 \\ \dots & \dots \\ \omega_{s,n} & L_{i,n}\omega_{s,n}^2 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -L_{i,1} \\ -L_{i,2} \\ \dots \\ -L_{i,n} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Burada ω_{sk} ve L_{ik} k . noktadaki j kayma frekansını ve endüktans bileşeninin imajiner kısmını belirtir. Kayma frekansı hesaplamalar için radyal forma çevrilmelidir ve 2π ile çarpılır. Matris ve vektör tanımlandıktan sonra problem çözülebilir.

$$m \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{Bmatrix} = b \quad (27)$$

En küçük kareler yöntemi ile bu problemin çözümü aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{Bmatrix} = (m^T m)^{-1} m^T b \quad (28)$$

Bu ifade çözüldüğünde c_1 , c_2 , M ve τ elde edilmiş olur. Endüktansın reel kısmı da benzer yolla çözülür.

$$L_r = \left(L_l + \frac{M}{1 + (\tau \omega_s)^2} \right) \quad (29)$$

Bulunan bu değerlerden sonra ortalama endüktans değeri hesaplanarak program sonuçlandırılır.

$$L_l = L_{r,k} - \frac{M}{1 + (\tau \omega_{s,k})^2} \quad (30)$$

3.3. SEY ile Stator Direnci Hesabı

Stator faz direnç değeri R_l ;

$$R_l = \rho \frac{l w_1}{A_{co} a_1} \quad (31)$$

Burada ρ öz direnç değerini, l bobin uzunluğunu, A_{co} tel kesit alanını, a_1 ise paralel kol sayısını ifade etmektedir.

3.4. SEY ile Rotor Direnci Hesabı

SEY ile rotor direnci hesabı ise aşağıdaki şekilde yapılır.

$$R_r = \frac{M}{\tau} \quad (32)$$

Bulunan bu direnç değeri oda sıcaklığındaki dirençtir. Bu yüzden çalışma sıcaklığındaki direnç değeri bulunmalıdır. Bu ise aşağıdaki gibi bulunabilir [20].

$$R_r = R_r \left(1 + T \frac{0.4}{100} \right) \quad (33)$$

4. ASENKRON MOTORUN OLUK YAPISI VE MOTOR ÖZELLİKLERİ

Analizler için 3 kW'lık sincap kafesli asenkron motor seçilmiştir. Asenkron motorun etiket değerleri Tablo-1'de, stator oluk yüksekliği (h_s), oluk sırt yüksekliği (h_{cs}) ve oluk üst genişliği (b_{s2}) değerlerinin değişim aralıkları Tablo 2'de, motorun stator oluk yapısı ise Şekil-2'de verilmiştir. Üretici firmanın ölçümlerinde stator dişlerindeki akı yoğunluğu değeri 1.66 T, rotor dişlerinde ise 1.69 T olarak elde edildiği görülmektedir. Bu değerler ortalama akı yoğunluğu değerleridir.

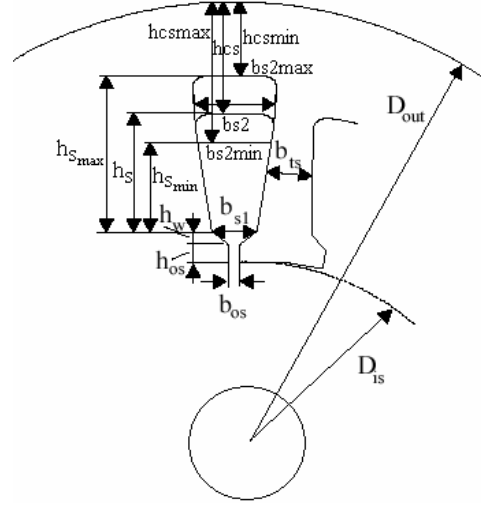
Tablo-1. Asenkron motor parametreleri

Motor Parametreleri	Değerler
Nominal Güç [kW]	3
Stator Gerilimi [Volt]	380
Bağlantı Şekli	Yıldız
Frekans [Hz]	50
Faz Sayısı	3
Güç Katsayısı	0.88
Verim	0.78
Senkron Devir Sayısı [d/d]	3000
Rotor Devir Sayısı [d/d]	2844
Stator Diş Akı Yoğunluğu [Tesla]	1.66
Rotor Diş Akı Yoğunluğu [Tesla]	1.69
Stator Oluk Geometrisi	Yuvarlak

Tablo-2. Oluk geometrisinin değişim aralıkları

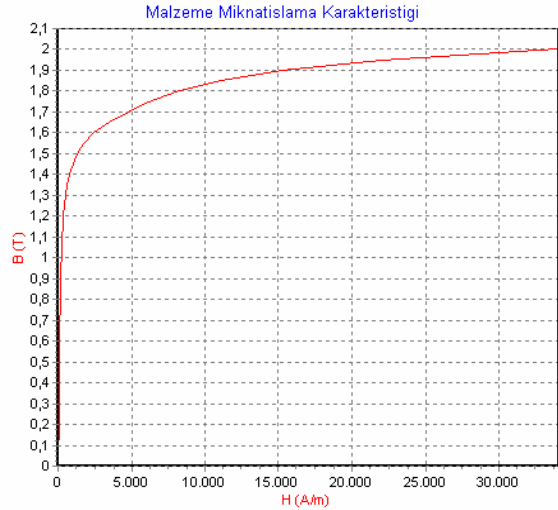
	h_s [mm]	h_{cs} [mm]	b_{s2} [mm]
Minimum	9	7	5.42
Maksimum	22	20	10.6

Burada vurgulanması gereken diğer bir nokta ise, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizler sırasında asenkron motorun iç-dış çap değerleri, rotor oluk yapısı ve boyutları ile hava aralığı uzunluğu değeri değişmemek kaydıyla stator oluk yüksekliği, oluk sırt yüksekliği ve oluk üst genişliği değerleri Tablo-2'de verilen aralıklarda değiştirilerek asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri ve ortalama akı yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır.



Şekil-2. Asenkron motorun stator oluk yapısı

Asenkron motorun B-H eğrisi Şekil-3'te verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde nüve özellikleri tanımlanırken B-H eğrisi de girilerek modellemeler yapılmıştır.



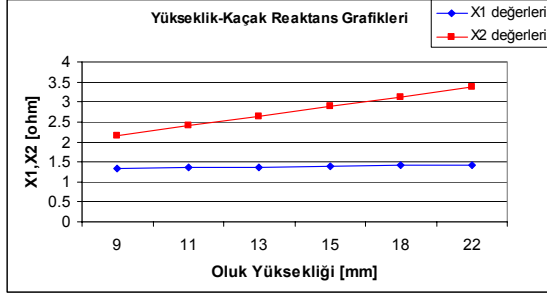
Şekil-3. Asenkron motorun mıknatıslanma grafiği

Asenkron motorun stator oluk geometrisi tasarlanırken oluk yüksekliği ve oluk üst genişliği arasında belli bir oran vardır. Bu oran çerçevesinde tasarım yapıldığı takdirde motordan daha iyi performans alınabilir. Düşük güçlü motorlar için bu oranın 0.6 ile 2.6 arasında olması istenir [22]. Eğer bu oran yüksek tutulursa kaçak reaktans değerinin arttığı görülür.

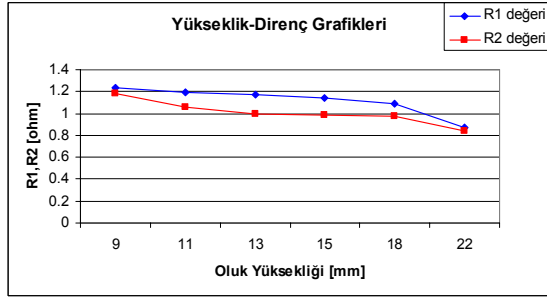
5. ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Asenkron motorun SEY ile modellenmesinden elde edilen stator oluk yüksekliği-kaçak reaktans (X_1, X_2) grafiği Şekil-4'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere yükseklik değeri arttıkça stator ve rotor kaçak reaktans değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi ise yükseklik değeri

artıkça stator nüvesinin sırt yükseklik değeri olan h_{cs} ' in azalması ve buna bağlı olarak nüve üzerinde hızlı bir doyuma meydana gelmesidir. Şekil-5' te ise yüksekliğe bağlı olarak stator ve rotor direnç (R_1 - R_2) değerlerinin değişim grafiği verilmiştir. Direnç değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. Direnç değerlerindeki azalmanın sebebi ise oluk alanının artmasına bağlıdır.



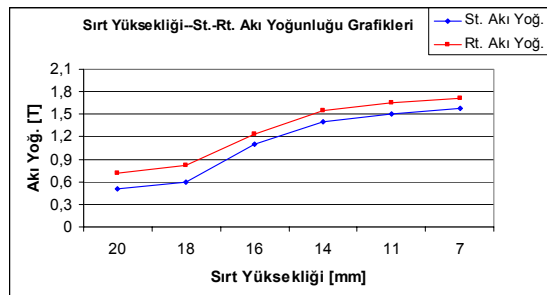
Şekil-4. Oluk yüksekliği-Kaçak reaktans grafiği



Şekil-5. Oluk yüksekliği-Direnç grafiği

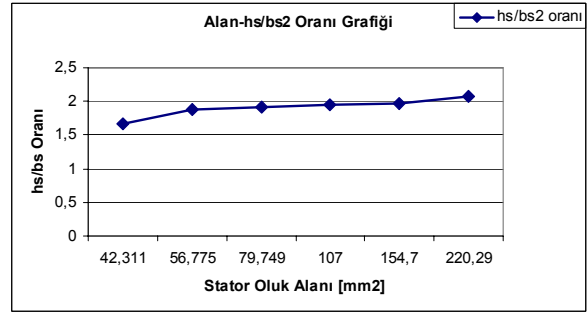
Tablo-3. Sırt yüksekliği-Ortalama akı yoğunluğu değerleri

h_{cs} [mm]	Stator Akı Değerleri [T]	Rotor Akı Değerleri [T]
20	0.5	0.71
18	0.6	0.82
16	1.1	1.24
14	1.4	1.55
11	1.5	1.66
7	1.58	1.72



Şekil-6. Oluk sırt yüksekliği-Ortalama akı yoğunluğu grafiği

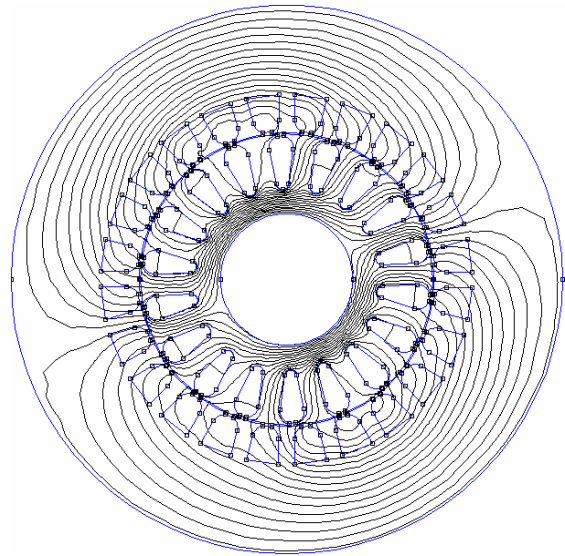
Tablo-3 ve Şekil-6' da ise stator ve rotor nüvesinde yeni oluşan geometri yapısına bağlı olarak nüve üzerindeki ortalama akı yoğunluğu değerleri ve grafiği verilmiştir. Tablo ve grafik incelendiğinde oluk sırt yüksekliği azaldıkça stator nüvesindeki akı yoğunluğu değerlerinin arttığı ve daha düşük yükseklik değerlerinde nüvenin doyuma ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde rotor nüvesinde de stator nüvesindeki akı değerlerine bağlı olarak sırt yüksekliği değeri düştükçe doyuma meydana geldiği görülmektedir.



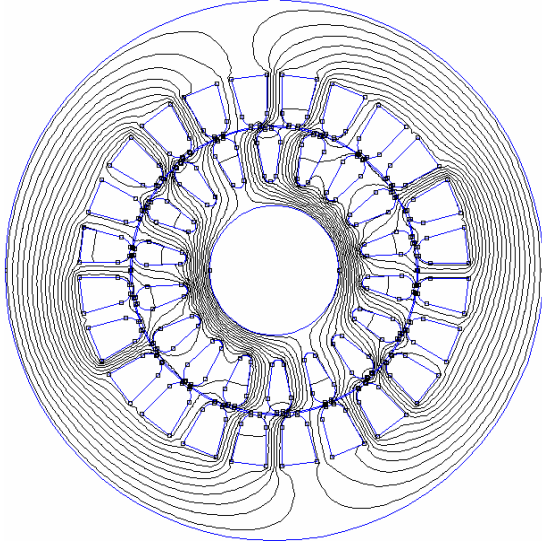
Şekil-7. Oluk alanı- h_s/b_{s2} oranı grafiği

Şekil-7' de ise elde edilen her bir yeni geometri için h_s/b_{s2} oranı grafiği, stator oluk alanına bağlı olarak verilmiştir ve bu oranın 1.66 ile 2 arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerlerin tasarım için uygun oranlar olduğu görülmektedir.

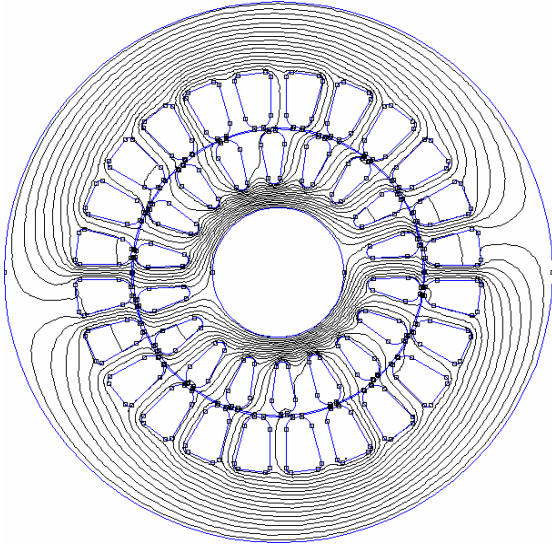
Stator oluk geometrisine bağlı olarak sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen magnetik alan dağılımları sırasıyla oluk yüksekliği 9 mm, 13 mm, 15 mm ve 18 mm için Şekil 8-9-10-11' de verilmiştir. Bu grafikler motorun nominal kayma değeri olan % 2.6 değerinde elde edilmiştir.



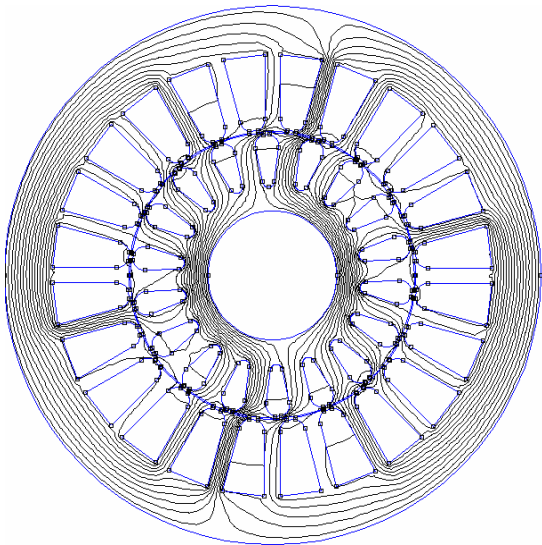
Şekil-8. 9 mm için MVP dağılımı



Şekil-9. 13 mm için MVP dağılımı



Şekil-10. 15 mm için MVP dağılımı



Şekil-11. 18 mm için MVP dağılımı

Grafikler incelendiğinde düşük oluk yüksekliğine sahip geometride simetrisinin bariz bir şekilde bozulduğu görülmektedir. Oluk yüksekliği bir miktar artırıldığında simetrisinin daha düzgün bir hal aldığı, daha yüksek oluk geometri değerleri için ise yine simetrisinin bozulduğu görülmektedir. Bunun sebebi yine nüve üzerinde doyumların meydana gelmesi ve kaçak reaktans değerlerinin artmasından kaynaklanmaktadır.

6. SONUÇLAR

Asenkron motorlar sanayide en çok kullanılan elektrik motorları olduğu için istenilen seviyede verimi verecek şekilde tasarımlarının yapılması gerekmektedir. Bu tasarım sırasında dikkat edilmesi gereken noktaların başında stator ve rotor oluk geometrileri ve yapısı gelmektedir. Düzgün bir tasarım sonucunda motordan istenilen optimum performans alınabilir. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerde h_s ' in küçük olduğu değerdeki magnetik vektör potansiyellerinin dağılımları incelendiğinde simetrisinin çok fazla derecede bozulduğu ve nüve üzerinde indüklenen ortalama akı yoğunluğu değerinin çok fazla olduğu ve nüvenin doyuma gittiği görülmüştür. Bu yüzden h_s değeri en uygun akı yoğunluğu değerini ve eşdeğer devre parametre değerlerini verecek şekilde seçilmelidir.

Bu çalışma göstermiştir ki, stator oluk yüksekliği arttırıldıkça stator ve rotor kaçak reaktans değerlerinin arttığı, direnç değerlerinin ise oluk alanına bağlı olarak azaldığı ve magnetik alan dağılımlarında simetrisinin bozulduğu görülmektedir. Bu yüzden oluk yüksekliği belirlenirken birçok önemli noktanın kontrolü yapılarak optimum yükseklik değeri seçilmelidir.

Çalışmamız sonucunda 3 kW' lık asenkron motor için oluk yüksekliği değeri 13 ile 17 mm arasındaki değerler için tasarımın yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] A., G., Yetgin, Üç Fazlı Asenkron Makina Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ss 139, 2004.
- [2] M., R., Feyzi, H., V., Kalankesh, Optimization of induction motor design by using the finite element method, pp 845-850.
- [3] A., G., Yetgin, A., İ., Çanakoğlu, Farklı Yöntemler Kullanarak Asenkron Motorun Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması, ELECO' 2004 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, ss 122-127, 8-12 Aralık, Bursa, 2004.

- [4] Ö., Kalenderli, Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, ITU Elektrik-Elektronik Fakültesi, 140s.
- [5] M., V., K., Chari, P., Silvester, Finite element analysis of magnetically saturated DC machines, IEEE, January 31-February 5, New York, pp 2362-2372, 1971.
- [6] M., V., K., Chari, P., Silvester, Analysis of turbo alternator magnetic fields by finite elements, IEEE Trans., Vol. PAS-90, pp 454-464, March/April, 1971.
- [7] O., W., Anderson, Transformer leakage flux program based on the finite element method, IEEE Trans., Vol. PAS-92, pp 682-689, March/April, 1973.
- [8] J., R., Brauer, Finite element analysis of elektromagnetic induction in transformers, IEEE PES Winter meeting, 5- Feb, pp A77-122, 1977.
- [9] J., R., Brauer, Flux patterns by the finite Element method, Conference Record of IEEE Applied Magnetics Workshop, No. 75CH-0964 7MAG, June, 1975.
- [10] J., R., Brauer, Finite element analysis of selenoids, transformers, generators, and motors, The MacNeal-Schwendler Corporation, Record of Cleveland Electronics Conference, IEEE No.78CH, pp 1300-1303, 1978.
- [11] J., R., Brauer, Finite element analysis of single phase and polyphase induction motors, The MacNeal-Schwendler Corporation, Conference Record of IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Philadelphia, PA, October, 1981.
- [12] S., Williamson, Lim, L., H., Robinson, J., M., Finite element models for cage induction motor analysis, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 26, No.6, pp 1007-1017, 1990.
- [13] L., T., Ergene, S., J., Salon, Y., Akiyama, Calculation of the Bar Resistance and Leakage Inductance in a Solid-Rotor Induction Motors with a One slot Model.
- [14] Brauer, J., R., Finite Element Analysis Of Selenoids, Transformers, Generators, And Motors, The MacNeal-Schwendler Corporation, Record of Cleveland Electronics Conference, IEEE No.78CH, pp 1300-1303, 1978.
- [15] Brauer, J., R., Finite Element Analysis Of Single Phase And Polyphase Induction Motors, The MacNeal-Schwendler Corporation, Conference Record of IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Philadelphia, PA, October, 1981.
- [16] Brauer, J., R., Finite Element Calculations Of Synchronous, Universal And Induction Motor Performance, The MacNeal-Schwendler Corporation, Presented at Motorcon Conference Proceeding, 1982.
- [17] Brauer, J., R., Finite Element Software AIDS Motor Design, The MacNeal-Schwendler Corporation, Presented at the Small Motor Manufacturers Assn., Tenth Annual Meeting Tapma, Florida, 1985.
- [18] Robinson, J., M., Finite Element Calculation Of Equivalent Circuit Parameters For Induction Motors, Ph.D. Thesis, Imperial College of Science and Technology London, University of London, November, p 194, 1983.
- [19] Williamson, S., Lim, L., Robinson, H., J., M., Finite Element Models For Cage Induction Motor Analysis, IEEE Transactions On Industry Application, Vol. 26, No.6, pp 1007-1017, 1990.
- [20] Meeker, D., 2002, Induction Motor Example. www.femm.fostermiller.net.
- [21] Çanakoğlu, A., İ., Şenol, İ., Bekiroğlu, D., V., Analytical and numerical calculation of inductance of aplunger-type magnet, Elece99 International Conference on Elc-Elt. Eng., pp 455-458, 1-5 December, Bursa, 1999.
- [22] O., Gürdal, Elektrik makinalarının tasarımı, Atlas Yayın Dağıtım, 1. Baskı, İstanbul, s 97-158, 2001.